

## **Intelligent Design of a Dynamic Facility Layout in the Stochastic Environment of Flexible Manufacturing Systems Considering Routing Flexibility**

**Gorbanali Moslemipour\*, Seyed Mohammad Ghadirpour\*\***

### **Abstract**

This paper aims at proposing a novel quadratic assignment-based mathematical model for designing an optimal facility layout in each period of the stochastic dynamic facility layout problem (SDFLP). Considering routing flexibility is the main assumption of this problem so that parts can pass through multiple routes. It is also assumed that product demands are independent, normally distributed random variables with known expected value and variance changing from period to period at random. In addition, to solve the proposed model, a new hybrid meta-heuristic algorithm is developed by combining simulated annealing (SA) and the CRAFT approaches. Finally, the proposed model and the hybrid algorithm are verified and validated using design of experiment, real case study and sensitivity analysis methods as well as solving some numerical examples. The results show that the hybrid algorithm has an outstanding performance from both solution quality and computational time perspectives. Moreover, the proposed model can be used to design the layout of facilities in both of the stochastic and deterministic environments of traditional and modern manufacturing systems.

**Keyword: Stochastic Dynamic Facility Layout Problem; Flexible Manufacturing Systems; Routing Flexibility; Simulated Annealing; CRAFT.**

---

Received: Oct. 30, 2019; Accepted: Feb. 13, 2021.

\* Assistant Professor, Payame Noor University (Corresponding Author).

ghmoslemipour@pnu.ac.ir

\*\* M.s, Payame Noor University.

## طراحی هوشمند استقرار پویای تسهیلات در محیط تصادفی سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مسیر تولید

قربانعلی مسلمی پور\*، سید محمد قدیر پور\*\*

### چکیده

در این پژوهش، ابتدا یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر مدل تخصیص درجه دوم برای طراحی استقرار بهینه تسهیلات در هر دوره از افق برنامه‌ریزی زمانی چنددوره‌ای مسئله استقرار پویا و تصادفی تسهیلات ارائه می‌شود. در این مدل، علاوه بر در نظر گرفتن مسیرهای چندگانه تولید برای قطعات، فرض می‌شود که تقاضای محصولات متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نرمال باشند؛ به طوری که میانگین و واریانس آن‌ها از یک دوره زمانی به دوره دیگر به طور تصادفی تغییر کند؛ همچنین برای حل مدل ریاضی پیشنهادی، یک الگوریتم ترکیبی فراابتکاری جدید با استفاده از الگوریتم‌های کرافت و شبیه‌سازی تبرید ارائه می‌شود. مدل و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با روش‌های طراحی آزمایش، مطالعه موردی واقعی، حل چند مسئله نمونه و انجام تحلیل حساسیت مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از نظر کیفیت جواب و زمان محاسبه نسبت الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده دارای عملکرد بهتری است؛ همچنین امکان استفاده از مدل پیشنهادی برای طراحی استقرار تسهیلات در محیط‌های تصادفی و قطعی سیستم‌های تولیدی سنتی و مدرن وجود دارد.

**کلیدواژه‌ها:** مسئله استقرار پویا و تصادفی تسهیلات؛ سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر؛  
انعطاف‌پذیری مسیر تولید؛ الگوریتم شبیه‌سازی تبرید؛ کرافت

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵.

\* استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه پیام نور، ایران (نویسنده مسئول).

Email: ghmoslemipour@pnu.ac.ir

\*\* کارشناس ارشد، دانشگاه پیام نور، ایران.

## ۱. مقدمه

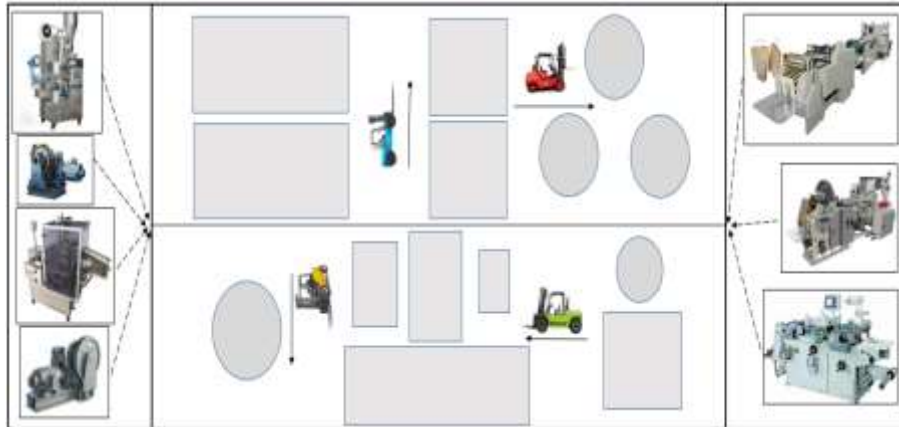
برای بقا در بازار رقابتی امروز، تولید محصول مطابق سلیقه مشتری امری اجتناب‌ناپذیر است. تغییر پیوسته نیازهای مشتریان، عدم قطعیت تقاضا را افزایش داده است. مؤسسه‌های تولیدی برای کسب سهمی از این بازار رقابتی باید انواع زیادی از محصولات را در حجم پایین، با نازل ترین قیمت و کوتاه‌ترین زمان تحویل تولید کنند. سیستم‌های تولید سنتی، مانند سیستم‌های تولید کارگاهی و تولید انبوه، دیگر پاسخگوی این شرایط نیستند. بر این اساس سیستم تولید انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> می‌تواند به‌عنوان راهبردی عملیاتی و تواناساز، مزیتی رقابتی محسوب شود [۲].

یکی از مسائل مورد توجه در مراحل اولیه طراحی سیستم‌های تولیدی، مسئله استقرار تسهیلات<sup>۲</sup> است که با حل بهینه آن، ترتیب قرارگرفتن تسهیلات (ماشین‌ها) به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که کل هزینه جابه‌جایی مواد<sup>۳</sup> حداقل شود. در خصوص اهمیت مسئله استقرار تسهیلات می‌توان به این نکته اشاره کرد که این مسئله تأثیر زیادی بر هزینه‌های تولید، به‌ویژه هزینه جابه‌جایی مواد، میزان موجودی قطعات در جریان ساخت، زمان تحویل محصول به مشتری و بهره‌وری سیستم های تولیدی دارد [۹]؛ همچنین هزینه جابه‌جایی مواد حدود بیست تا پنجاه درصد هزینه‌های کل تولید را تشکیل می‌دهد و این هزینه با طراحی بهینه استقرار تسهیلات از حداقل ۱۰ تا ۳۰ درصد قابل کاهش است [۳۹].

مسئله استقرار تسهیلات از نظر شکل بخش‌ها به دو شاخه با مساحت‌های برابر<sup>۴</sup> و نابرابر<sup>۵</sup> طبقه‌بندی می‌شود. هر کدام از این مسائل دارای فرمول‌بندی مختص به خود هستند [۹]. در نمایشی شماتیک، نیمه بالایی شکل ۱، مسئله استقرار تسهیلات با مساحت‌های برابر و نیمه پایینی آن مسئله استقرار تسهیلات با مساحت‌های نابرابر را نشان می‌دهد؛ همچنین FLP را می‌توان با توجه به ماهیت قطعی یا تصادفی بودن تقاضای محصولات و نیز با توجه به تک دوره‌ای (ایستا) و چنددوره‌ای (پویا) بودن افق برنامه‌ریزی به انواع زیر طبقه‌بندی کرد:

الف) مسئله استقرار ایستای تسهیلات؟ در این مسئله، تقاضای محصولات و در نتیجه جریان مواد بین تسهیلات در طول افق برنامه‌ریزی تک‌دوره‌ای مقداری معلوم و ثابت است. هدف این مسئله حداقل کردن هزینه کل جابه‌جایی مواد بین تسهیلات است.

- 
1. Flexible Manufacturing System (FMS)
  2. Facility Layout Problem (FLP)
  3. Material Handling Cost (MHC)
  4. Equal Area Facility Layout Problem (EA-FLP)
  5. Unequal Area Facility Layout Problem (UA-FLP)
  6. Static Facility Layout Problem (SFLP)



شکل ۱. نمایش شماتیک انواع استقرار تسهیلات از نظر مساحت [۱۴]

ب) مسئله استقرار پویای تسهیلات<sup>۱</sup>: یکی از روش‌های تعیین مقادیر آینده تقاضای محصولات، روش پیش‌بینی است و از آنجاکه خطای پیش‌بینی در افق زمانی بلندمدت بیشتر از دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت است، در مسئله استقرار تسهیلات، افق‌های زمانی طولانی‌مدت (برای مثال، افق‌های چندساله) به دوره‌های زمانی کوچک‌تر (مانند سال، ماه و هفته) تقسیم می‌شوند و بدین ترتیب مسئله تک‌دوره‌ای (ایستای) استقرار تسهیلات به یک مسئله چنددوره‌ای (پویای) تسهیلات تبدیل می‌شود. در این مسئله، تقاضای محصولات و در نتیجه میزان جریان مواد بین تسهیلات در هر دوره زمانی مقداری ثابت و معلوم است؛ اما از یک دوره به دوره‌ای دیگر تغییر می‌کند. به عبارت دیگر هر دوره زمانی را می‌توان یک مسئله ایستا در نظر گرفت. هدف مسئله استقرار پویای تسهیلات، تعیین طرح استقرار تسهیلات در هر دوره زمانی است؛ به گونه‌ای که مجموع هزینه‌های جابه‌جایی مواد و هزینه‌های مربوط به تغییر طرح استقرار از یک دوره به دوره‌ای دیگر (هزینه‌های بازآرایی تسهیلات) حداقل شود [۲۶].

ج) مسئله استقرار ایستای تصادفی تسهیلات<sup>۲</sup>: از آنجاکه تقاضای محصولات معمولاً با استفاده از روش‌های غیردقیق، مانند روش‌های پیش‌بینی یا استفاده از روند تغییرات آن در گذشته تعیین می‌شوند، معقول‌تر و واقعی‌تر آن است که تقاضای محصولات تصادفی در نظر گرفته شود. بدین ترتیب، مسئله استقرار ایستای تصادفی تسهیلات، افق برنامه‌ریزی تک‌دوره‌ای (ایستا) را در نظر گرفته و فرض می‌کند تقاضای محصولات تصادفی است.

1. Dynamic Facility Layout Problem (DFLP)
2. Rearrangement Cost (RC)
3. Stochastic Static Facility Layout Problem (SSFLP)

د) مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات<sup>۱</sup>: در این مسئله نیز همانند مسئله پویای تسهیلات در حالت قطعی (حالت ب)، افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای است؛ اما تقاضای محصولات در هر دوره زمانی، به جای قطعی و معین بودن، متغیری تصادفی فرض می‌شود؛ به گونه‌ای که پارامترهای آن (مانند میانگین و واریانس) از یک دوره به دوره‌ای دیگر تغییر می‌کنند.

مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات یکی از جامع‌ترین، واقعی‌ترین و پیچیده‌ترین انواع مسائل استقرار تسهیلات است؛ به طوری که سه نوع نخست آن (الف، ب و ج) حالت خاصی از این مسئله محسوب می‌شوند. به همین دلیل در این پژوهش چنین مسئله‌ای طراحی می‌شود؛ همچنین با توجه به فرض تصادفی بودن تقاضای محصولات در این مسئله، مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات در سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر بررسی می‌شود؛ زیرا چنین سیستم‌هایی هم پاسخگوی نیازهای رقابتی هستند و هم از مناسب‌ترین سیستم‌های تولیدی در محیط‌های تصادفی به شمار می‌آیند. یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر از حداقل چهار ماشین خودکار چندکاره تشکیل شده است؛ به طوری که این ماشین‌ها به صورت مکانیکی توسط سیستم‌های حمل‌ونقل مواد و به صورت الکترونیکی توسط یک سیستم کنترل رایانه‌ای با یکدیگر مرتبط می‌شوند [۱۳]. در این پژوهش، مدل ریاضی جدیدی مبتنی بر مدل تخصیص درجه دوم<sup>۲</sup> برای طراحی استقرار پویا و تصادفی تسهیلات در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر پیشنهاد می‌شود. مدل پیشنهادی، استقرار بهینه تسهیلات در هر دوره زمانی از افق برنامه‌ریزی را با در نظر گرفتن مسیرهای چندگانه تولید (انعطاف‌پذیری در تولید) در یک محیط تصادفی تعیین می‌کند. در این مدل فرض می‌شود که تقاضای محصولات متغیرهای تصادفی مستقل با توزیع نرمال هستند؛ به طوری که میانگین و واریانس آن‌ها از یک دوره زمانی به دوره دیگر به طور تصادفی تغییر می‌کنند.

جدید بودن مدل به دلیل در نظر گرفتن مسیرهای چندگانه تولید<sup>۳</sup> است که یکی از ویژگی‌های سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر محسوب می‌شود. مسیرهای تولید انعطاف‌پذیر امکان تولید محصولات از طریق مسیرهای مختلف شامل ماشین‌ها و ایستگاه‌های کاری گوناگون را فراهم می‌کنند. از آنجاکه مسئله تخصیص درجه دوم از نوع NP-Hard است [۳۲]، مدل پیشنهادی این مقاله نیز NP-Hard بوده و با افزایش اندازه مسئله، زمان حل به صورت نمایی افزایش می‌یابد و امکان استفاده از روش‌های دقیق برای حل آن در ابعاد بزرگ وجود ندارد؛ در نتیجه حل آن، به ویژه برای مسائل در ابعاد بزرگ، توسط روش‌های دقیق میسر نیست و باید از روش‌های فراابتکاری<sup>۴</sup> بهره گرفت.

- 
1. Stochastic Dynamic Facility Layout Problem (SDFLP)
  2. Quadratic Assignment Problem (QAP)
  3. Routing Flexibility (RF)
  4. Meta-heuristic Algorithms

قابلیت الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید<sup>۱</sup> در یافتن جواب بهینه سراسری و نیز سهولت اجرای آن سبب شده است که این الگوریتم در حل بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به کار رود. جواب به دست آمده توسط روش‌های فراابتکاری برای مسائل بزرگ معمولاً بهینه دقیق نیست، بلکه نزدیک به بهینه است [۱۰]؛ همچنین می‌توان عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری را به منظور یافتن جواب بهتر (نزدیک‌تر به بهینه) و نیز کاهش زمان محاسبه (زمان لازم برای حل مسئله) بهبود بخشید. به عنوان دومین نوآوری و هدف این پژوهش، به منظور بهبود جواب نهایی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید عمومی، الگوریتم ترکیبی مبتنی بر استفاده از الگوریتم کرافت<sup>۲</sup> برای بهبود جواب اولیه پیشنهاد شده است؛ زیرا کیفیت جواب نهایی و نیز زمان محاسبه به کیفیت جواب اولیه وابسته هستند [۲۰].

## ۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در دنیای واقعی منوط به وقایع آینده هستند. پیش‌بینی آینده نیز با عدم قطعیت همراه است؛ زیرا مفهوم عدم قطعیت با مفهوم اطلاعات ارتباط دارد؛ بنابراین عدم قطعیت منعکس‌کننده کمبود اطلاعات است. عدم قطعیت محیط عملیاتی ممکن است به هزینه‌های غیرمنتظره در عملکرد سیستم منجر شود [۳۳].

در مسئله استقرار پویای تسهیلات، تقاضای محصول مقادیری معلوم و قطعی فرض می‌شوند که با استفاده از تکنیک‌های پیش‌بینی یا روند تغییرات آن‌ها در گذشته به دست می‌آیند؛ اما با توجه به وجود خطا در پیش‌بینی و در نتیجه عدم تطابق مقادیر تقاضای واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده، استقرار بهینه طراحی شده در هر دوره زمانی بر اساس مقادیر پیش‌بینی تقاضای محصولات لزوماً در عمل بهینه نخواهد بود. بر این اساس، در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و فرض تقاضای محصولات به عنوان متغیرهایی تصادفی، امری معقول و اجتناب‌ناپذیر است.

جیتاوج و کریشنان<sup>۳</sup> (۲۰۱۰)، نیز در نظر گرفتن تقاضای تصادفی محصولات و شرایط عدم قطعیت را به عنوان ماهیت ذاتی و واقعی محیط‌های تولیدی را امری اجتناب‌ناپذیر دانستند [۱۵]. پالکار<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۲)، مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح درجه دوم طراحی کردند. آن‌ها سه درجه از عدم قطعیت، شامل تخمین خوش بینانه، تخمین محتمل و تخمین بدبینانه را برای تقاضای محصولات در نظر گرفتند و به هر یک از این تخمین‌ها عددی به عنوان احتمال وقوع نسبت دادند؛ همچنین به هر ماتریس جریان مواد در هر دوره زمانی یک مقدار تخمینی از احتمال اختصاص یافت و از زنجیره مارکف برای مدل‌سازی

1. Simulated Annealing (SA)

2. Computerized Relative Allocation of Facilities Technique (CRAFT)

3. Jithavech, I., & Krishnan, K.

4. Palekar US

تغییرات شرطی تقاضا از دوره‌ای به دوره زمانی دیگر استفاده شد [۳۰].

مونتریول و لافروج<sup>۱</sup> (۱۹۹۲)، با استفاده از درختی از سناریوهای محتمل تقاضای محصولات در آینده، اقدام به طراحی مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات کردند. در روش پیشنهادی آن‌ها، چندین استقرار به‌عنوان گزینه‌های احتمالی استقرار تسهیلات در آینده ایجاد شد [۲۳]. مسلمی‌پور (۲۰۱۷) با فرض وجود وابستگی بین تقاضای محصولات، یک مدل ریاضی جدید برای طراحی یک چیدمان استوار درون‌سلولی و بین‌سلولی<sup>۲</sup> در محیط پویا و تصادفی سیستم‌های تولیدی ارائه کرد. با استفاده از این مدل، چیدمان سلول‌ها در سالن تولید و نیز چیدمان ماشین‌های درون هر سلول به‌طور هم‌زمان تعیین می‌شوند [۲۴]. بن‌جعفر و شیخ‌زاده<sup>۳</sup> (۲۰۰۰)، به‌منظور مقابله با عدم قطعیت در تقاضای محصولات، استقراری استوار و انعطاف‌پذیر از تسهیلات را با به‌کارگیری دو تسهیل مشابه به‌طور هم‌زمان در سالن تولید، طراحی کردند [۶]. براگلیا<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۳)، انعطاف‌پذیرترین استقرار تک‌ردیفه تسهیلات را با فرض تقاضای محصولات به‌عنوان متغیرهایی تصادفی مستقل و دارای توزیع نرمال طراحی کردند [۷]. ویتایاساک<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۹)، مدلی را برای طراحی یک چیدمان استوار در یک افق زمانی چند دوره‌ای با در نظر گرفتن برنامه‌ریزی نگهداری ماشین‌آلات ارائه و از الگوریتم ژنتیک<sup>۶</sup> برای حل آن استفاده کردند [۳۳]. توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۷)، یک مدل ریاضی جدید را برای طراحی مسئله استقرار ایستای تصادفی تسهیلات در سیستم‌های تولید سلولی ارائه کردند که هدف آن، حداقل سازی هم‌زمان هزینه‌های جابه‌جایی مواد درون‌سلولی و بین‌سلولی بود [۳۸]. کریشنان<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۸)، سه مدل ریاضی را برای طراحی استقرار تسهیلات در یک محیط تصادفی با در نظر گرفتن سناریوهای چندگانه تقاضای محصولات پیشنهاد کردند و از الگوریتم ژنتیک برای حل این مدل‌ها بهره گرفتند [۱۷]. مسلمی‌پور و لی<sup>۸</sup> (۲۰۱۲)، یک مدل ریاضی برای حل مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات در یک سیستم تولید انعطاف‌پذیر بدون توجه به انعطاف‌پذیری مسیر تولید پیشنهاد دادند. آن‌ها تقاضای محصولات را متغیرهایی تصادفی مستقل با توزیع نرمال فرض کردند که میانگین و واریانس آن‌ها از یک دوره به دوره دیگر به‌طور تصادفی تغییر می‌کند [۲۶]. لی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید با استفاده از الگوریتم‌های کولونی مورچگان و تبرید شبیه‌سازی شده برای حل مسائل بهینه‌سازی مانند مسئله طرح استقرار تسهیلات ارائه کردند [۲۰]. آن‌ها از مدل پیشنهادی مسلمی‌پور و لی (۲۰۱۲) برای ارزیابی

- 
1. Montreuil, B., & LaForge, A.
  2. Robust Inter and Intra-cell Layout
  3. Benjaafar, S., & Sheikhzadeh, S.
  4. Braglia, M.
  5. Vitayasak, S.
  6. Genetic Algorithm (GA)
  7. Krishnan, K. K.
  8. Lee, T. S.

عملکرد این الگوریتم بهره گرفتند. تایال و سینق<sup>۱</sup> (۲۰۱۴) برای حل مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نامنظم<sup>۲</sup> استفاده کردند [۳۷]. فرقانی و همکاران (۲۰۱۳)، با در نظر گرفتن تقاضای تصادفی محصولات، استقراری استوار و انعطاف‌پذیر درون‌سلولی و بین‌سلولی از تسهیلات را در یک سیستم تولید سلولی طراحی کردند [۱۲]. نعمتیان (۲۰۱۴)، مدلی را برای طراحی استقرار استوار با آرایش تک‌ردیفه از تسهیلات با فرض تقاضای محصولات به‌عنوان متغیرهایی تصادفی و فازی پیشنهاد کرد [۲۹]. پوروزیری و نادری (۲۰۱۴)، الگوریتم ژنتیک چند جمعیتی ترکیبی را برای حل مسئله استقرار پویای تسهیلات پیشنهاد کردند [۳۱].

آزاده و همکاران (۲۰۱۴)، مسئله استقرار پویای دارای تسهیلات هم‌اندازه را با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها و الگوریتم جستجوی ممنوع حل کردند [۱]. فضل‌اللهی و همکاران (۲۰۱۵)، مدلی را برای طراحی استقراری استوار از تسهیلات در محیطی پویا و با به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک ارائه دادند [۱۱]. درخشان اصل و کوان<sup>۳</sup> (۲۰۱۵)، مسائل پویا و ایستای تسهیلات را با فرض تسهیلاتی با سطوح نابرابر به‌وسیله الگوریتم ازدحام ذرات حل کردند [۸]. لی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، از الگوریتم ژنتیک برای حل یک مدل تخصیص درجه دومی یک مسئله استقرار تسهیلات بهره گرفتند [۱۹]. ویتایاساک<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، اقدام به طراحی استقرار تسهیلات با فرض تقاضای محصول به‌عنوان متغیری تصادفی کردند [۴۰]. تایال و سینق<sup>۱</sup> (۲۰۱۷)، مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات را با تأکید بر NP-Hard بودن آن با پیشنهاد یک روش حل ترکیبی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و روش‌های تاپسیس<sup>۶</sup> و تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۷</sup> طراحی کردند [۳۶].

**مسئله تخصیص درجه دوم.** مسئله تخصیص درجه دوم، یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی غیرخطی است که هدف آن، تعیین تخصیص بهینه تعداد معینی شیء به همان تعداد موقعیت معلوم است؛ به‌گونه‌ای که معیاری مانند هزینه کل این تخصیص حداقل شود. به‌طور کلی مسائل استقرار تسهیلاتی که دارای نمایش گسسته باشند را می‌توان به‌صورت مدل مسئله تخصیص درجه دوم فرموله کرد. سرانجام با حل این مدل و یافتن مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مشخص می‌شود چه تسهیلی باید در چه مکانی قرار گیرد؛ به‌گونه‌ای که هزینه کل حداقل شود. بالاکریشنان<sup>۸</sup> و همکاران (۱۹۹۲)، مدل تخصیص درجه دوم (روابط ۱ تا ۴) را برای فرموله کردن

- 
1. Tayal, A., & Singh, S.
  2. Chaotic Simulated Annealing
  3. Kuan, K. Y.
  4. Lee, H. Y.
  5. Vitayasak, S.
  6. TOPSIS
  7. Data envelopment analysis (DEA)
  8. Balakrishnan, J.



مسئله استقرار پویای تسهیلات در محیط قطعی و نه تصادفی سیستم‌های تولیدی پیشنهاد دادند [۴]. از آنجاکه در پژوهش حاضر از این مدل برای ساخت مدل پیشنهادی استفاده شده است، روابط آن به شرح زیر ارائه می‌شود:

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M f_{tij} d_{lq} x_{til} x_{tjq} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$+ \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M a_{tilq} x_{(t-1)il} x_{tiq}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^M x_{til} = 1 : \forall t, l \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_{l=1}^M x_{til} = 1 : \forall t, i \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$x_{til} = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره زمانی } t \text{ تسهیل } i \text{ به مکان } l \text{ تخصیص یابد.} \\ 0 & \text{و. و} \end{cases} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این مدل، متغیر تصمیم  $x_{tij}$ ، مکان هر تسهیل را تعیین می‌کند. تابع هدف ۱، مجموع هزینه کل جابه‌جایی مواد بین تسهیلات و هزینه کل بازاریابی (تغییر طرح استقرار از یک دوره به دوره‌ای دیگر) است و محدودیت‌های ۲ و ۳ نیز متضمن تخصیص هر تسهیل تنها به یک مکان و جای دادن تنها یک تسهیل در هر مکان هستند. سایر پارامترهای این مدل در بخش روش شناسی پژوهش معرفی می‌شوند.

**الگوریتم شبیه‌سازی تبرید.** الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، همان‌طوری که از نام آن مشخص است، شبیه‌سازی فرآیند واقعی تبرید جامدات در مکانیک آماری است. این الگوریتم از اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان روش قابل‌قبولی برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی سخت با صرف زمان محاسباتی معقول، کماکان مورد استفاده قرار گرفته است؛ همچنین این الگوریتم روشی تصادفی مبتنی بر تکرار و جست‌وجوی محلی است که قابلیت یافتن جواب سراسری بهینه یا جواب نزدیک به بهینه (به‌ویژه در مسائل ابعاد بزرگ) را دارد. کیرک پاتریک<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۸۳)، نخستین الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی سخت، مانند طراحی یک تراشه رایانه و مسئله فروشنده دوره‌گرد پیشنهاد دادند [۱۸]. سومان و کومار<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) مرور خوبی روی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید انجام داده‌اند [۳۵].

مسلمی‌پور و همکاران (۲۰۱۲)، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را به همراه سایر الگوریتم‌های فرا-ابتکاری و هوشمند برای حل مسائل پویا و استوار استقرار تسهیلات در سیستم‌های تولید انعطاف-

1. Kirkpatrick, S.

2. Suman, B., & Kumar, P.

پذیر در یک مقاله مروری به طور جامع بررسی کردند [۲۷]. مسلمی پور و همکاران (۲۰۱۸)، یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی دیگر با استفاده از الگوریتم‌های انتخاب کلونال<sup>۱</sup>، کلونی مورچگان<sup>۲</sup> و شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله استقرار پویای تسهیلات در محیط تصادفی ارائه دادند [۲۸]. مسلمی پور (۲۰۱۶)، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای یک مدل ریاضی جدید مبتنی بر مسئله تخصیص درجه دوم برای تعیین استقرار بهینه درون سلولی برای هر دوره زمانی به نام طرح استقرار پویا در محیط تصادفی سیستم‌های تولید سلولی با در نظر گرفتن ارزش زمانی پول استفاده کرد [۲۵]. لی<sup>۳</sup> و مسلمی پور (۲۰۱۲)، با کمینه‌سازی واریانس هزینه جابه‌جایی مواد برای تمام دوره‌های افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای، طرح استقراری از سلول‌های تولیدی ارائه کردند که دارای حداکثر پایداری، یعنی حداقل حساسیت نسبت به تغییرات تقاضای محصولات است [۲۱].

**روش برنامه‌ریزی پویا<sup>۴</sup>.** از آنجاکه در این پژوهش برای اعتبارسنجی مدل و ارزیابی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از روش برنامه‌ریزی پویا نیز برای حل مسائل استفاده شده است، مراحل این روش با توجه به پژوهش بالاکریشنان و چنگ<sup>۵</sup> (۱۹۹۸) به صورت رابطه بازگشتی زیر بیان می‌شوند [۳]:

$$C_{jt}^* = \text{Min}\{C_{i(t-1)}^* + A_{ij}\} + F_{jt} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه ۵،  $F_{jt}$  هزینه جابه‌جایی مواد برای چیدمان  $j$  در دوره زمانی  $t$ ،  $A_{ij}$  هزینه تغییر از چیدمان  $i$  به چیدمان  $j$ ،  $C_{i(t-1)}^*$  حداقل مقدار هزینه کل شامل هزینه‌هایی جابه‌جایی مواد و تغییر چیدمان تا چیدمان  $i$  در دوره زمانی  $(t-1)$  و  $C_{jt}^*$  حداقل مقدار هزینه کل شامل هزینه‌هایی جابه‌جایی مواد و تغییر چیدمان تا چیدمان  $j$  در دوره زمانی  $t$  است.

- 
1. Clonal Selection (CS)
  2. Ant Colony (AC)
  3. Lee, H. Y.
  4. Dynamic Programming (DP)
  5. Balakrishnan, J., & Cheng, C. H.

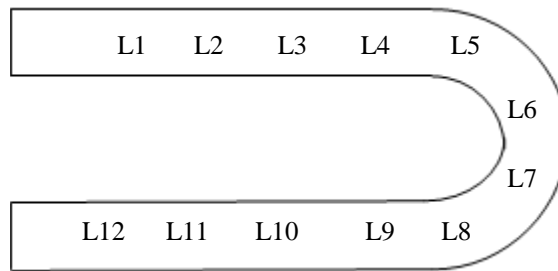
### ۳. روشی شناسایی پژوهش

در این بخش، ابتدا مفروضات مدل، سپس اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها و در نهایت مدل ریاضی مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات پیشنهادی، ارائه می‌شود. نوآوری به‌کاررفته در این مدل در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مسیر تولید محصولات به‌عنوان ویژگی مهم سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر است که در هیچ‌یک از پژوهش‌های پیشین به آن پرداخته نشده است.

مفروضات مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

- ترکیب و شکل‌بندی استقرار از قبل مشخص است؛
- مکان تسهیلات و در نتیجه فاصله بین این مکان‌ها در کل افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای معلوم و ثابت است و از تسهیلات هم‌اندازه و نیز مکان‌های هم‌اندازه استفاده می‌شود؛
- در هر دوره زمانی، هزینه جابه‌جایی هر قطعه در واحد طول عددی معلوم فرض می‌شود؛
- هزینه تغییر مکان هر تسهیل از یک مکان در یک دوره زمانی به مکانی دیگر در دوره زمانی بعدی ( $a_{t|tq}$ ) عددی معلوم فرض می‌شود؛
- تعداد تسهیلات و تعداد مکان‌های آن‌ها با هم برابر هستند؛
- نمایش گسسته طرح استقرار در نظر گرفته می‌شود؛
- تقاضای محصولات (قطعات) ساخته‌شده در سیستم تولید انعطاف‌پذیر، متغیرهای تصادفی مستقل دارای توزیع نرمال فرض می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که میانگین (امید ریاضی) و واریانس آن‌ها در هر دوره معلوم است؛ اما از یک دوره زمانی به دوره دیگر به‌طور تصادفی تغییر می‌کنند. علت استفاده از توزیع نرمال این است که بیشتر پدیده‌های طبیعی از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند؛ همچنین سایر توزیع‌های آماری را می‌توان تحت شرایطی به توزیع نرمال تقریب زد؛
- مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات در نظر گرفته می‌شود؛
- هیچ محدودیتی برای ابعاد و شکل کف کارخانه وجود ندارد؛
- امکان تولید هر یک از محصولات (قطعات) از طریق چندین مسیر وجود دارد (انعطاف‌پذیری مسیر تولید)؛ به‌گونه‌ای که شانس انتخاب هر مسیر به‌صورت یک مقدار احتمال بیان می‌شود. جدید بودن مدل پیشنهادی در این پژوهش نیز به دلیل وجود همین فرض است؛
- اندازه دسته برای هر قطعه، ۱ در نظر گرفته شده است؛
- محدودیتی در خصوص پیکربندی و نحوه استقرار تسهیلات (ماشین‌ها) در سطح کارخانه وجود ندارد؛ بدین معنی که مدل پیشنهادی قابلیت طراحی استقرار تسهیلات با هر نوع آرایشی را دارد و پیکربندی تسهیلات هیچ تأثیری بر مدل‌سازی ندارد؛ یعنی با تغییر آرایش خط تولید، مدل پیشنهادی بدون هیچ تغییری کماکان قابل‌استفاده است. با توجه به این توضیح، پیکربندی U-شکل که آرایشی مناسب در شرایط عدم قطعیت همانند تصادفی بودن تقاضا است را نیز می

توان در نظر گرفت. این آرایش در شکل ۲، نشان داده شده است که در آن،  $L_1, L_2, \dots, L_{12}$  مکان ماشین‌ها هستند.



شکل ۲. پیکربندی ماشین‌ها در سطح کارخانه

**اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی.** مسیرهای تولید چندگانه و احتمال انتخاب آن‌ها، تعداد مسیرهای تولید برای هر قطعه، هزینه جابه‌جایی هر قطعه در هر دوره زمانی، فاصله بین مکان تسهیلات، هزینه تغییر مکان تسهیلات از یک مکان در یک دوره زمانی به مکانی دیگر در دوره زمانی بعدی، میانگین (امید ریاضی) و واریانس تقاضای محصولات در هر دوره زمانی و تعداد دوره‌های زمانی در کل افق برنامه‌ریزی به‌عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته می‌شوند. خروجی این مدل، متغیرهای تصمیم هستند که تعیین‌کننده مکان بهینه استقرار هر تسهیل در هر دوره زمانی می‌باشند. اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی به شرح زیر هستند:

$i$ : اندیس مربوط به شماره تسهیل،  $i = 1, 2, \dots, M$ ؛  $i \neq j$

$l, q$ : شماره مکان تسهیل  $l, q = 1, 2, \dots, M$ ؛  $l \neq q$

$M$ : پارامتر مربوط به تعداد کل تسهیلات (یا تعداد کل مکان (موقعیت‌های تسهیلات))

$n$ : تعداد مسیر تولید،  $(n = 1, 2, \dots, N)$

$\alpha_{nk}$ : احتمال انتخاب مسیر  $n$ ام برای تولید قطعه  $k$ ام

$t$ : دوره زمانی  $(t = 1, 2, \dots, T)$

$T$ : تعداد کل دوره‌های زمانی در افق زمانی کل

$k$ : تعداد قطعات  $(k = 1, 2, \dots, K)$

$E()$ : امید ریاضی (میانگین).  $Var()$ : واریانس

$N_{ki}$ : شماره عملیات برای عملیات انجام شده بر روی قطعه  $k$ ام به‌وسیله تسهیل  $i$ ام

$x_{til}$ : متغیر تصمیم که در رابطه ۴، تعریف شده است.

$d_{lq}$ : فاصله بین دو مکان (موقعیت)  $l$  و  $q$

$f_{tijkn}$ : جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  برای قطعه  $k$ ام و مسیر تولید  $n$ ام

$f_{tijk}$ : جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  ناشی از قطعه  $k$   
 $f_{tij}$ : جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  ناشی از تمام قطعات  
 $D_{tk}$ : تقاضای قطعه  $k$  در دوره زمانی  $t$   
 $C_{tk}$ : هزینه جابه‌جایی قطعه  $k$  به اندازه واحد طول در دوره زمانی  $t$   
 $C(\pi)$ : هزینه کل جابه‌جایی مواد برای طرح استقرار  $\pi$   
 $a_{tilq}$ : هزینه تغییر مکان تسهیل  $i$  از مکان  $l$  در دوره  $t-1$  به مکان  $q$  در دوره  $t$   
 $R_c$ : هزینه بازآرایی (تغییر طرح استقرار تسهیلات)  
 $T_c$ : هزینه کل

**مدل ریاضی پیشنهادی.** با توجه به مفروضات یکسان بودن تعداد تسهیلات و مکان‌های آن‌ها، در نظر گرفتن نمایش پیوسته استقرار تسهیلات و هم‌اندازه بودن تسهیلات (مکان‌ها) از مدل تخصیص درجه دوم برای ساختن مدل طراحی استقرار پویای تسهیلات در شرایط تصادفی بودن تقاضای محصولات و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مسیر تولید استفاده می‌شود. منظور از انعطاف‌پذیری مسیر تولید، امکان تولید هر یک از محصولات توسط چندین مسیر تولید است که احتمال انتخاب هر مسیر  $n$  برای تولید قطعه  $k$  با  $\alpha_{nk}$  نشان داده می‌شود. جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  ناشی از قطعه  $k$  در دوره زمانی  $t$  هنگام استفاده از مسیر تولید  $n$  از رابطه  $\epsilon$  به دست می‌آید:

$$f_{tijkn} = \begin{cases} D_{tk} \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} & |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۶)}$$

به دو عمل متوالی اشاره دارد که روی قطعه  $k$  به وسیله تسهیلات  $i$  و  $j$  انجام شده است. در هر دوره زمانی، تقاضا برای قطعه  $k$  ( $D_{tk}$ ) متغیری تصادفی دارای توزیع نرمال به ترتیب با میانگین و واریانس معلوم  $E(D_{tk})$  و  $Var(D_{tk})$  است. با توجه به رابطه  $\epsilon$  جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  ناشی از قطعه  $k$  و انتخاب مسیر تولید  $n$  ( $f_{tijkn}$ ) نیز دارای توزیع نرمال با میانگین و واریانس زیر خواهد بود:

$$E(f_{tijkn}) = \begin{cases} E(D_{tk}) \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} & |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$Var(f_{tijkn}) = \begin{cases} Var(D_{tk}) \cdot C_{tk}^2 \cdot \alpha_{nk}^2 & |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۸)}$$

امید ریاضی جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  ناشی از قطعه  $k$ ام با در نظر گرفتن تمام مسیرهای تولید  $(E(f_{tijk}))$  از رابطه ۹، به دست می آید:

$$E(f_{tijk}) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N E(f_{tijn}) \cdot \alpha_{nk} & \text{اگر } |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۹)}$$

با جایگذاری رابطه ۷ در رابطه ۹، داریم:

$$E(f_{tijk}) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N E(D_{tk}) \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} & \text{اگر } |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

واریانس جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  ناشی از قطعه  $k$ ام با در نظر گرفتن تمام مسیرهای تولید  $(Var(f_{tijk}))$  از رابطه ۱۱، به دست می آید:

$$Var(f_{tijk}) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N Var(f_{tijn}) \cdot \alpha_{nk}^2 & \text{اگر } |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

با جایگذاری رابطه ۸ در رابطه ۱۱ داریم:

$$Var(f_{tijk}) = \begin{cases} \sum_{n=1}^N Var(D_{tk}) \cdot C_{tk}^2 \cdot \alpha_{nk}^2 & \text{اگر } |N_{ki} - N_{kj}| = 1 \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$   $(f_{tij})$  از رابطه ۱۳، به دست می آید:

$$f_{tij} = \sum_{k=1}^K f_{tijk} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

از آنجا که  $f_{tijk}$  متغیری تصادفی با توزیع نرمال است،  $f_{tijk}$  نیز متغیری تصادفی با توزیع نرمال خواهد بود که امید ریاضی و واریانس آن به ترتیب از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$E(f_{tij}) = \sum_{k=1}^K E(f_{tijk}) \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

با قراردادن رابطه ۱۰ در رابطه ۱۴، رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$E(f_{tij}) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E(D_{tk}) \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

از آنجاکه تقاضای محصولات (قطعات) مستقل از یکدیگر فرض شده‌اند، کوواریانس صفر بوده و واریانس جریان مواد بین تسهیلات  $i$  و  $j$  در دوره زمانی  $t$  از رابطه ۱۶، قابل محاسبه است:

$$Var(f_{tij}) = \sum_{k=1}^K Var(f_{tijk}) \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

با جایگذاری رابطه ۱۲ در رابطه ۱۶، داریم:

$$Var(f_{tij}) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Var(D_{tk}) \cdot C_{tk}^2 \cdot \alpha_{nk}^2 \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

با توجه به مدل تخصیص درجه دوم (روابط ۱ تا ۴)، هزینه حمل‌ونقل مواد برای طرح استقرار  $\pi$  از رابطه ۱۸ و هزینه بازآرایی طرح استقرار ( $R_c$ ) از رابطه ۱۹، به دست می‌آید:

$$C(\pi) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M f_{tij} d_{lq} x_{til} x_{tjq} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

$$R_c = \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M a_{tilq} Y_{tilq} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

با توجه به  $Y_{tilq} = x_{(t-1)il} x_{tjq}$ ، رابطه ۱۹ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$R_c = \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M a_{tilq} \cdot x_{(t-1)il} x_{tjq} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

روابط ۱۸ و ۲۰، به ترتیب جملات اول و دوم رابطه ۱ هستند.

هزینه کل ( $T_c$ ) از جمع هزینه حمل‌ونقل مواد برای طرح استقرار  $\pi$  ( $C(\pi)$ ) و هزینه بازآرایی طرح استقرار ( $R_c$ )، به دست می‌آید:

$$T_c = C(\pi) + R_c \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

چون  $f_{tij}$  متغیری تصادفی با توزیع نرمال است،  $C(\pi)$  نیز از توزیع نرمال پیروی خواهد کرد. امید ریاضی  $C(\pi)$  با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$E(C(\pi)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M E(f_{tij}) \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

با قراردادن رابطه ۱۵ در رابطه ۲۲، رابطه ۲۳ حاصل خواهد شد:

$$E(C(\pi)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E(D_{tk}) \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

به طور مشابه واریانس  $C(\pi)$  از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$Var(C(\pi)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M Var(f_{tij}) \left( \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} \right)^2 \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

با قراردادن رابطه ۱۷ در رابطه ۲۴، رابطه زیر به دست می آید:

$$Var(C(\pi)) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Var(D_{tk}) \cdot C_{tk}^2 \cdot \alpha_{nk}^2 \left( \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} \right)^2 \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

اگر تصمیم گیرنده<sup>۱</sup>،  $U(\pi, P)$  را به عنوان مقدار بیشینه (کران بالای)  $C(\pi)$  با سطح اطمینان  $P$  در نظر بگیرد، آنگاه  $U(\pi, P)$  به صورت معادله ۲۶، بیان می شود [۲۶].

$$U(\pi, P) = E(C(\pi)) + Z_p \sqrt{Var(C(\pi))} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

برای به دست آوردن استقرار بهینه، رابطه ۲۱ (تابع هدف) باید حداقل شود. در این رابطه به جای حداقل کردن  $C(\pi)$  می توان کران بالای آن، یعنی  $U(\pi, P)$  را حداقل کرد. پس تابع هدف ۲۱ می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$T_c = U(\pi, P) + R_c \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

در نهایت با استفاده از روابط ۲۴ تا ۲۷، مدل زیر پیشنهاد می گردد:

$$\begin{aligned} \text{minimize } z = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E(D_{tk}) \cdot C_{tk} \cdot \alpha_{nk} \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} + \\ & Z_p \sqrt{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N Var(D_{tk}) \cdot C_{tk}^2 \cdot \alpha_{nk}^2 \left( \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M d_{lq} x_{til} x_{tjq} \right)^2} + \\ & \sum_{t=2}^T \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{q=1}^M a_{tilq} \cdot x_{(t-1)il} x_{tiq} \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^M x_{til} = 1; \quad \forall t, l \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$\sum_{l=1}^M x_{til} = 1; \quad \forall t, i \quad \text{رابطه (۳۰)}$$



$$x_{til} = \begin{cases} 1 & \text{اگر در دوره زمانی } t \text{ تسهیل } i \text{ به مکان } l \text{ تخصیص یابد.} \\ 0.w & \end{cases} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

رابطه ۲۸، تابع هدف مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد که از سه جمله تشکیل شده است. مجموع جملات اول و دوم هزینه کل جابه‌جایی مواد را نشان می‌دهد و جمله سوم نمایانگر هزینه کل بازاریابی (تغییر طرح استقرار از یک دوره به دوره‌ای دیگر) است. با وجود ماهیت تصادفی تقاضای محصولات، پارامترهای مدل پیشنهادی دارای مقادیری معلوم و قطعی هستند. تمامی اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل پیشنهادی فوق، در بخش روش شناسی پژوهش به‌طور کامل معرفی شده‌اند. تقاضای قطعه  $k$  در دوره زمانی  $t$ ، یعنی  $Dtk$  متغیری تصادفی با توزیع نرمال فرض شده است؛ بنابراین به‌جای معلوم بودن مقدار قطعی آن در هر دوره زمانی و در نتیجه تک‌جمله‌ای بودن هزینه جابه‌جایی مواد، مقادیر میانگین و واریانس آن در هر دوره زمانی معلوم است و بدین ترتیب، هزینه جابه‌جایی مواد در مدل پیشنهادی (رابطه ۲۸) از دو جمله تشکیل شده است. در این مدل، شرایط عدم قطعیت توسط پارامترهای  $E(Dtk)$ ،  $\alpha_{nk}$  و  $Z_p$  بیان می‌شود. مقدار  $Z_p$  در اختیار تصمیم‌گیرنده (طراح استقرار تسهیلات) قرار دارد؛ بنابراین تصمیم‌گیرنده می‌تواند با تغییر مقدار آن، میزان تأثیر جمله دوم یا به عبارت دیگر میزان تأثیر واریانس تقاضا بر هزینه کل را تغییر دهد و با کاهش این تأثیر می‌تواند استقرار را به سمت پایداری بیشتر، یعنی تأثیرپذیری کمتر از واریانس تقاضا سوق دهد.

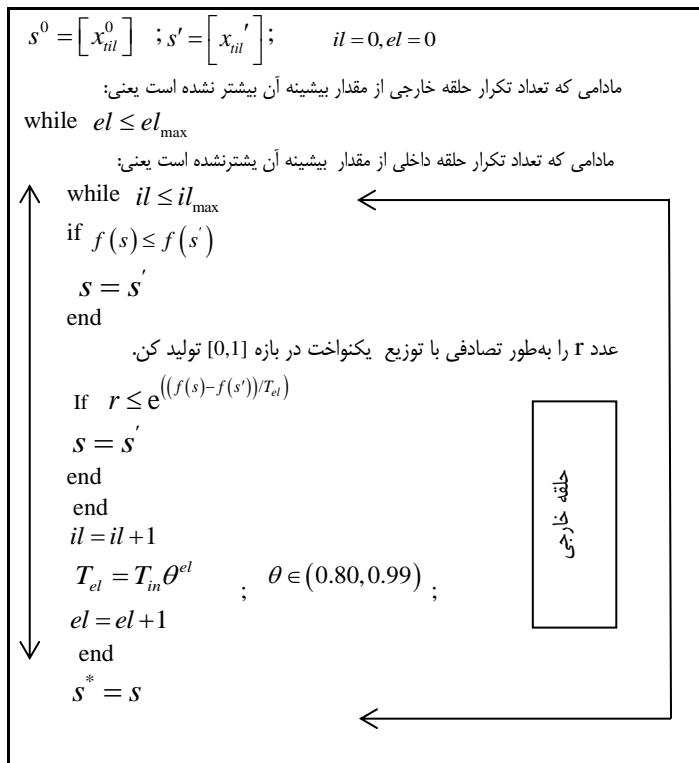
مدل ارائه‌شده در این مقاله به‌عنوان نخستین نوآوری این پژوهش، با قابلیت در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری مسیرهای تولید که به‌صورت پارامتر  $\alpha_{nk}$  و با انجام محاسبات ریاضی (روابط ۶ تا ۲۷) در مدل پیشنهادی (رابطه ۲۸) ظاهر شده است از سایر مدل‌های پیشین، به‌ویژه از مدل پیشنهادشده مسلمی‌پور و لی<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) متمایز است. به عبارت دیگر این پارامتر را می‌توان به‌عنوان یک ورودی جدید علاوه بر پارامترهای ورودی مدل مسلمی‌پور و لی<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) در نظر گرفت؛ به‌گونه‌ای که این مدل پیشنهادی علاوه بر آنکه همانند مدل‌های پیشین، قابلیت طراحی استقرار پویای تسهیلات در محیط تصادفی سیستم‌های تولیدی سنتی را دارا است (با در نظر گرفتن  $\alpha_{nk} = 1$  و  $n = 1$ )، در سیستم‌های مدرن، مانند سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر که دارای مسیرهای تولید چندگانه هستند نیز کاربرد دارد. در این سیستم‌ها، انعطاف‌پذیری مسیرهای تولید از ویژگی‌ها و مزایای مهم رقابتی به‌شمار می‌رود.

الگوریتم ترکیبی پیشنهادی. با توجه به آن که مسئله تخصیص درجه دوم از نوع مسائل بهینه سازی ترکیبی سخت و چندجمله‌ای غیرقطعی کامل<sup>۱</sup> محسوب می‌شود؛ زمان حل آن با افزایش اندازه مسئله، به‌طور نمایی افزایش می‌یابد [۲۶]؛ بنابراین استفاده از روش‌های دقیق برای حل این مسئله فقط در ابعاد کوچک میسر است و برای حل این مسئله در ابعاد بزرگ باید از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری بهره جست. این روش‌ها، بر خلاف روش‌های دقیق، معمولاً جواب نزدیک به بهینه را به‌دست می‌دهند؛ اما توانایی حل مسئله در ابعاد بزرگ را نیز در زمان معقول دارند. اگرچه الگوریتم‌های ابتکاری و کارای متعددی، همانند روش تندترین شیب، برای حل مدل تخصیص درجه دوم وجود دارند، اما این روش‌ها عمدتاً در مقایسه با روش‌های فراابتکاری به زمان بیشتری برای حل مسئله نیاز دارند و احتمال افتادن آن‌ها در دام جواب بهینه محلی بیشتر است [۵]؛ همچنین الگوریتم‌های ابتکاری به نوع مسئله وابسته هستند؛ یعنی فقط قادر به حل همین مدل خاص بوده، اما روش‌های فراابتکاری قادر به حل هر نوع مدل ریاضی بهینه‌سازی هستند.

شبه‌کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مورداستفاده در این پژوهش در شکل ۳، ارائه شده است. این الگوریتم دارای دو حلقه داخلی و خارجی است که به ترتیب به فرآیندهای جست‌وجوی محلی و خنک‌سازی اختصاص دارند. در این شکل،  $S$  جواب فعلی است که به صورت ماتریس  $S = [x_{til}]$  نشان داده می‌شود.  $S^0 = [x_{til}^0]$  نیز جواب اولیه موردنیاز این الگوریتم است که به‌طور تصادفی تولید می‌شود و  $S' = [x_{til}']$  جواب همسایه جواب فعلی  $S$  است؛ همچنین  $S^* = [x_{til}^*]$  نشان‌دهنده جواب بهینه بوده و  $f$  تابع هزینه کل را نشان می‌دهد.  $el_{max}$ ،  $T_{in}$  و  $il_{max}$  به ترتیب درجه حرارت اولیه، تعداد تکرار حلقه‌های خارجی (el) و داخلی (il) این الگوریتم را نشان می‌دهند که اعداد معلومی متناسب با ابعاد مسئله فرض می‌شوند. پارامتر  $\theta$  نیز نرخ خنک‌سازی است.

با توجه به توضیحات بالا، برای حل مدل پیشنهادی که مبتنی بر مدل تخصیص درجه دوم است، یک روش فراابتکاری ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های کرافت و شبیه‌سازی تبرید به‌عنوان دومین نوآوری این پژوهش ارائه شده است. همان‌گونه که بیان شد، کیفیت جواب نهایی و زمان محاسبه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به کیفیت جواب اولیه آن بستگی دارد؛ بنابراین، در این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم کرافت برای ساختن جواب اولیه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده می‌شود؛ سپس جواب اولیه حاصل به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده توسط میسی ویوس<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) اعمال خواهد شد [۲۲]. جواب مسئله استقرار پویای تسهیلات به‌صورت یک ماتریس نمایش داده می‌شود.

1. NP-Complete  
2. Misevicius, A.



شکل ۳. شبه‌کد الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

#### ۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

در این بخش، برای تحلیل داده‌ها و اعتبارسنجی مدل و همچنین ارزیابی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از روش‌های طراحی آزمایش، مطالعه موردی واقعی، حل چند مسئله نمونه در اندازه‌های مختلف و انجام تحلیل حساسیت با استفاده از روش تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده می‌شود.

**روش طراحی آزمایش.** در این روش ابتدا ۱۰۰ مسئله آزمایشی به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند. در هر یک از این مسائل، تعداد تسهیلات و تعداد دوره‌های زمانی به‌ترتیب ۴ و ۳ فرض می‌شوند. بدین ترتیب اندازه این مسائل به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته می‌شوند تا امکان حل آن‌ها توسط روش دقیق برنامه‌ریزی پویا فراهم شود. از آنجاکه مطلوب است هر یک از این مسائل به‌طور تصادفی تولید شوند، میانگین و واریانس تقاضای قطعات، به‌ترتیب به‌صورت اعدادی در بازه‌های  $[1000, 1000]$  و  $[3000, 1000]$  به‌طور تصادفی با توزیع یکنواخت تولید

می‌شوند. هزینه جابه‌جایی هر تسهیل ۱۰۰۰ واحد پولی و احتمال انتخاب هر مسیر ۱ فرض می‌شود. مکان تسهیلات، مربعاتی با ابعاد واحد طول در نظر گرفته می‌شوند که فاصله بین مراکز این مکان‌ها از نوع متعامد است؛ سپس با فرض سطح اطمینان  $P=0/75$ ، هر یک از این ۱۰۰ مسئله به مدل پیشنهادی اعمال شده و توسط روش برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل می‌شوند. بدین ترتیب ۱۰۰ مقدار بهینه تابع هدف به‌ازای هر روش حل به‌دست می‌آید. به‌عبارت‌دیگر با توجه به تولید تصادفی این مسائل، این ۱۰۰ مقدار را می‌توان به‌عنوان یک نمونه تصادفی ۱۰۰ تایی برای هر روش حل در نظر گرفت و بر اساس آن فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای تفاضل میانگین دو جامعه آماری دارای توزیع نرمال (با توجه به پیروی تقاضای تابع هدف از توزیع نرمال) که جامعه اول شامل مقادیر بهینه تابع هدف حاصل از حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و جامعه دوم شامل مقادیر بهینه تابع هدف حاصل از حل مدل توسط روش برنامه‌ریزی پویا، به‌صورت  $[-226720, 226354]$  به‌دست می‌آید که یک فاصله تقریباً متقارن است و در نتیجه میانگین جامعه اول تقریباً با میانگین جامعه دوم برابر است؛ به‌عبارت‌دیگر با اطمینان ۹۵ درصد، جواب حاصل از حل مدل توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تقریباً معادل با جواب حاصل از حل این مدل توسط روش برنامه‌ریزی پویا است. به‌عنوان نمونه، برای یکی از این ۱۰۰ مسئله، مقادیر تابع هدف حاصل از روش برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی پیشنهادی به ترتیب ۷۰۵۸۴۰۰۰ و ۷۰۶۲۱۰۰ به‌دست آمده است که بسیار به هم نزدیک هستند. با توجه به اینکه روش برنامه‌ریزی پویا، روش دقیقی است و جواب بهینه دقیق را به‌دست می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت جواب حاصل از حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در حد روش برنامه‌ریزی پویا است؛ یعنی کیفیت الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تبرید شبیه‌سازی شده در حد بهینه یا بسیار نزدیک به بهینه است. حل مدل پیشنهادی توسط دو روش برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و دستیابی به جواب‌های تقریباً یکسان نیز خود حاکی از اعتبار و درستی مدل پیشنهادی است.

**حل مسئله واقعی.** در این قسمت، داده‌های دو مسئله چیدمان ماشین‌آلات در «شرکت هواپیمایی ریتون»<sup>۱</sup> واقع در ایالات متحده آمریکا برگرفته از کریشنان<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶) و «شرکت ذوب شمال» واقع در استان گلستان به مدل پیشنهادی اعمال و توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی حل می‌شود.

در شرکت ریتون، ۶ قطعه توسط ۲۱ ماشین هم‌اندازه پردازش می‌شوند. هزینه جابه‌جایی هر قطعه،  $3/75$  دلار در هر واحد فاصله (برحسب فوت) فرض می‌شود و فاصله بین مراکز مکان‌های

1. Raytheon Aircraft Company  
2. Krishnan, K. K.

ماشین‌ها از نوع اقلیدسی است. از آنجاکه در این مسئله، تقاضای سالیانه قطعات به صورت اعدادی معلوم داده شده است و در نتیجه امکان محاسبه میانگین و واریانس آن‌ها وجود ندارد، برای اعمال آن به مدل پیشنهادی، این مقادیر تقاضا به عنوان میانگین تقاضای قطعات در نظر گرفته می‌شوند که در جدول ۱، ارائه شده‌اند. سطح اطمینان مورد نظر تصمیم‌گیرنده (طراح چیدمان) نیز معادل ۵۰ درصد در نظر گرفته می‌شود که بدین ترتیب  $Z_p=0$  به دست می‌آید و عبارت شامل واریانس از مدل پیشنهادی (رابطه ۲۸) حذف می‌شود. در واقع مدل پیشنهادی که برای شرایط تصادفی-بودن قطعات ساخته شده است، در شرایط قطعی نیز قابل استفاده است. داده‌های مربوط به مسیر تولید قطعات در جدول ۲، ارائه شده است و با توجه به وجود تنها یک مسیر تولید برای هر قطعه، احتمال انتخاب هر مسیر، ۱ فرض می‌شود که بدین ترتیب امکان استفاده مدل در سیستم‌های تولیدی سنتی و فاقد مسیرهای تولید چندگانه نیز فراهم می‌شود. نتایج حل مدل با الگوریتم پیشنهادی، به همراه نتایج به دست آمده از روش ارائه شده توسط کریشنان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، در جدول ۳، آورده شده است که مقایسه آن‌ها با یکدیگر حاکی از بهبود زیاد در مقدار تابع هدف و دستیابی به استقرار بهتر تسهیلات برای هر یک از دوره‌ها در یک افق زمانی پنج‌ساله است.

جدول ۱. امید ریاضی تقاضای قطعات برای پنج سال

قطعه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲۰۰۲	۱۵	۸	۱۸	۱۸	۱۶	۱۷
۲۰۰۳	۱۹	۲۵	۲۵	۲۱	۲۷	۲۱
۲۰۰۴	۳۳	۳۷	۳۹	۴۳	۳۹	۴۲
۲۰۰۵	۵۸	۶۴	۵۸	۵۶	۵۸	۵۷
۲۰۰۶	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶	۴۶

جدول ۲. مسیر تولید قطعات

شماره قطعه (k)	مسیرهای تولید
۱	۱۰-۱۳-۵-۱۸-۱۴-۲۱-۱۵-۱-۱۱-۱۹-۲۰
۲	۱۰-۱۲-۵-۴-۱۸-۱۴-۲۱-۱۴-۱۸-۱۵-۱-۱۱-۱۹-۲۰
۳	۱۰-۸-۹-۱۰-۵-۱۸
۴	۳-۴-۱۰-۸-۹-۱۰-۴-۱۸
۵	۲-۱۰-۸-۹-۱۰-۵-۱۸
۶	۱۵-۱۷-۶-۲-۱۶-۹-۱۰-۷-۵-۱۸

1. Krishnan, K. K.

جدول ۳. نتایج (مقادیر تابع هدف)

سال	کریشانان و همکاران (۲۰۰۶)	الگوریتم ترکیبی پیشنهادی	درصد بهبود
۲۰۰۲	۱۹۴۶۳۸/۷۶	۱۷۶۳۲۹	۹
۲۰۰۳	۲۱۱۴۲۸/۰۷	۱۸۹۷۴۶	۱۰/۳
۲۰۰۴	۳۴۷۶۷۵/۶۲	۳۰۱۴۷۹	۱۳/۲
۲۰۰۵	۴۶۴۶۷۵/۳۲	۴۵۳۹۱۳	۲/۳
۲۰۰۶	۵۶۰۸۷۸/۴۲	۴۸۷۲۵۶	۱۳/۱

«شرکت ذوب شمال»، تولیدکننده قطعات اتومبیل، از ۶ ماشین سی‌ان‌سی<sup>۱</sup> هم‌اندازه استفاده می‌کند. در خصوص نحوه به‌کارگیری مدل پیشنهادی پژوهش حاضر در این شرکت، با در نظر گرفتن دوره‌های زمانی سالانه، با معلوم‌بودن تقاضای روزانه محصولات، مقادیر مربوط به میانگین و واریانس تقاضای محصولات در هر سال (دوره زمانی) با استفاده روابط مربوط به محاسبه میانگین و واریانس نمونه در آمار و در نظر گرفتن ۳۶۵ نمونه در هر سال (با فرض هر سال ۳۶۵ روز) محاسبه و به ترتیب در جدول‌های ۴ و ۵، آورده شده‌اند. داده‌های مربوط به مسیر تولید قطعات و فاصله بین مکان‌های تسهیلات به ترتیب در جدول‌های ۶ و ۷، ارائه شده است. هزینه جابه‌جایی ماشین و هر قطعه به ترتیب ۲۰۰ دلار و ۱ دلار در نظر گرفته شده است. به ازای سه سطح اطمینان (p) ۰/۷۵، ۰/۸۵ و ۰/۹۵، مقادیر هزینه در کل افق زمانی پنج‌ساله به ترتیب ۱/۰۸۰۲، ۱/۱۹۷۵ و ۱/۳۹۷۲ میلیون دلار به دست آمده و چیدمان بهینه هر سال نیز با چیدمان مورد استفاده در شرکت یکسان و ۱۲۳۴۵۶ است. دلیل این امر استفاده از استقرار محصولی در این شرکت است. بدین ترتیب درستی و اعتبار مدل تأیید شد؛ زیرا با توجه به مدل پیشنهادی (رابطه ۲۸)، مطابق انتظار با افزایش مقادیر سطوح اطمینان (p)، مقادیر تابع هدف افزایش یافت و نیز مطابق با انتظار، همان نوع استقرار محصولی مورد استفاده در شرکت به عنوان بهترین چیدمان به دست آمد.

جدول ۴. امید ریاضی تقاضای قطعات برای پنج سال

قطعه	۱	۲	۳	۴
۲۰۰۷	۴۳	۴۳	۳۶	۴۷
۲۰۰۸	۴۲	۴۴	۳۷	۴۵
۲۰۰۹	۴۳	۴۱	۳۶	۴۶
۲۰۱۰	۴۱	۴۲	۳۸	۴۵
۲۰۱۱	۴۲	۴۰	۳۵	۴۲

جدول ۵. واریانس تقاضای قطعات برای پنج سال

قطعه	۱	۲	۳	۴
۲۰۰۷	۲۰	۱۰	۷	۱۶
۲۰۰۸	۲۱	۱۰	۷	۱۵
۲۰۰۹	۲۰	۱۱	۶	۱۶
۲۰۱۰	۲۰	۹	۱۰	۱۵
۲۰۱۱	۲۲	۱۰	۸	۱۵

جدول ۶. مسیر تولید قطعات

شماره قطعه (k)	مسیرهای تولید
۱	۱-۲-۳-۴-۵-۶
۲	۱-۲-۳-۴
۳	۱-۲-۳-۴
۴	۱-۲-۳-۴

جدول ۷. فاصله بین مکان ماشین‌ها

	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۱	۰	۵۰۰	۵۷۰	۶۹۰	۱۲۹۰	۲۰۶۰
۲	۵۰۰	۰	۷۰	۱۹۰	۷۹۰	۱۵۶۰
۳	۵۷۰	۷۰	۰	۱۲۰	۷۲۰	۱۴۹۰
۴	۶۹۰	۱۹۰	۱۲۰	۰	۶۰۰	۱۳۷۰
۵	۱۱۲۹۰	۷۹۰	۷۲۰	۶۰۰	۰	۷۷۰
۶	۲۰۶۰	۱۵۶۰	۱۴۹۰	۱۳۷۰	۷۷۰	۰

**حل مسائل نمونه.** سه مسئله نمونه الف، ب و ج به ترتیب به عنوان مسائلی با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند: مسئله الف: تعداد ماشین‌آلات ( $M=6$ )، مسئله ب: تعداد ماشین‌آلات ( $M=15$ ) و مسئله ج: تعداد ماشین‌آلات ( $M=30$ ). هر یک از مسائل الف، ب و ج در دو افق برنامه‌ریزی زمانی با تعداد دوره‌های زمانی  $T=5$  و  $T=10$  و در سه سطح اطمینان  $P=0/75$ ،  $P=0/85$  و  $P=0/95$  به مدل پیشنهادی اعمال می‌شوند و با استفاده از روش شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده توسط میسی ویوس<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) و نیز با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ترکیبی پیشنهادی این پژوهش حل می‌شوند. همان‌گونه که بیان شد، برای هر یک از این سه مسئله، ۲ افق زمانی مختلف و ۳ سطح اطمینان در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب هر مسئله در  $2 \times 3$  یعنی ۶ حالت و با توجه به وجود سه مسئله، در نهایت ۱۸ مسئله متفاوت تولید و حل می‌شوند. سایر داده‌ها برای تمام این مسائل به شرح زیر هستند: در افق

1. Misevicius, A.

برنامه‌ریزی چنددوره‌ای، هر دوره زمانی یک سال در نظر گرفته می‌شود. هزینه حمل و نقل قطعات برای تمام دوره‌ها مقدار ثابت ۵ واحد پولی به‌ازای واحد طول در نظر گرفته شده و هزینه جابه‌جایی هر تسهیل از دوره‌ای به دوره دیگر ثابت و برابر ۱۰۰۰ واحد پولی فرض می‌شود. تعداد قطعات نیز ۵ در نظر گرفته شده است. امید ریاضی و واریانس تقاضای محصول برای تمام دوره‌های زمانی به‌صورت تصادفی تولید شده که در جدول‌های ۸، ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند؛ همچنین ماتریس مسافت بین مکان تسهیلات برای تمام مسائل، از قبل موجود بوده و به عنوان پارامتر ورودی مسئله می‌باشد.

جدول ۸. امید ریاضی و واریانس تقاضای قطعات برای دوره‌های زمانی ۱ تا ۳

	T=1		T=2		T=3	
	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس
۱	۵/۲۴۹	۱/۶۴۵	۲/۳۴۶	۱/۳۴۵	۲/۶۵۹	۱/۳۷۹
۲	۳/۷۲۳	۲/۵۹۴	۷/۶۱۳	۱/۵۶۷	۹/۳۴۶	۱/۹۲۶
۳	۳/۹۲۳	۲/۳۲۹	۱/۹۴۸	۲/۶۳۷	۷/۶۱۵	۲/۳۲۱
۴	۶/۹۲۷	۱/۷۶۵	۷/۳۴۸	۱/۶۹۱	۵/۳۱۶	۱/۸۲۶
۵	۷/۵۱۹	۱/۹۸۳	۲/۲۶۸	۲/۲۶۸	۳/۲۶۱	۱/۳۸۶

جدول ۹. امید ریاضی و واریانس تقاضای قطعات برای دوره‌های زمانی ۴ تا ۶

	T=4		T=5		T=6	
	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس
۱	۱/۳۴۶	۲/۶۱۹	۶/۳۴۶	۲/۳۲۴	۹/۶۴۵	۲/۳۴۶
۲	۲/۳۱۲	۱/۲۳۴	۲/۳۴۶	۱/۶۹۴	۵/۳۱۲	۱/۶۱۹
۳	۴/۵۶۴	۲/۹۴۱	۹/۶۱۹	۱/۱۶۹	۳/۳۴۳	۱/۶۴۲
۴	۹/۳۲۱	۱/۴۳۲	۸/۳۴۳	۱/۳۴۹	۶/۵۴۶	۲/۳۴۶
۵	۲/۷۶۲	۱/۹۱۶	۸/۹۳۱	۲/۳۲۹	۳/۲۴۶	۱/۳۱۸

جدول ۱۰. امید ریاضی و واریانس تقاضای قطعات برای دوره‌های زمانی ۷ تا ۱۰

	T=7		T=8		T=9		T=10	
	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس	میانگین	واریانس
۱	۱/۳۳۲	۲/۱۳۲	۲/۶۱۸	۱/۴۳۶	۲/۴۴۵	۲/۳۷۹	۳/۴۶۳	۱/۴۶۵
۲	۹/۶۱۶	۱/۱۹۲	۹/۶۱۹	۱/۲۱۹	۷/۳۵۶	۱/۴۴۹	۷/۹۱۳	۱/۹۱۲
۳	۴/۲۳	۱/۴۶۹	۵/۳۳۲	۱/۵۷۸	۵/۶۱۳	۲/۶۴۳	۸/۸۸۹	۱/۷۳۲
۴	۲/۶۵۴	۲/۴۳۹	۲/۶۴۹	۲/۳۴۹	۳/۶۱۹	۱/۲۶۴	۴/۶۱۹	۲/۶۲۱
۵	۳/۹۱۳	۱/۱۹۷	۷/۱۱۹	۱/۹۱۷	۱/۹۱۲	۱/۷۳۲	۵/۲۳۱	۲/۱۲۹



جدول‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳، توالی ماشین‌ها برای تولید قطعات از طریق مسیرهای مختلف را به همراه احتمال انتخاب هر مسیر به ترتیب برای مسائل الف، ب و ج نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، برای قطعه ۳ توالی عملیات تولید یا مسیر تولید در مسئله ۱، با احتمال  $0/8$  مسیر ۱-۴-۳ و با احتمال  $0/2$  مسیر تولید ۱-۵ انتخاب می‌شوند. مسیر ۱-۴-۳ به این معنی است که برای تولید قطعه ۳، عملیات اول توسط ماشین ۳، عملیات دوم توسط ماشین ۴ و عملیات سوم توسط ماشین ۱ روی این قطعه انجام می‌شوند. در این مثال با توجه به تعریف پارامتر  $N_{ki}$  که شماره عملیات انجام شده بر روی قطعه  $k$ م به وسیله ماشین  $i$ ام را نشان می‌دهد،  $N_{33}$ ،  $N_{34}$  و  $N_{31}$  به ترتیب معادل ۱، ۲ و ۳ هستند. جواب مسئله به صورت ماتریس نشان داده می‌شود؛ به طوری که هر سطر نشان‌دهنده یک دوره و هر ستون نشان‌دهنده یک مکان و هر درایه ماتریس نمایانگر شماره یک ماشین است. جواب اولیه ( $\pi$ ) مورد نیاز برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به طور دلخواه، بدین صورت به دست می‌آید که در هر دوره زمانی، تسهیلات به طور متوالی در مکان‌ها قرار می‌گیرند. برای مثال، نخستین تسهیل در مکان یک، تسهیل دو در مکان دو و به همین ترتیب الی آخر. برای نمونه، جدول ۱۴، جواب اولیه را در حالت  $T=5$  برای مسئله الف نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده توسط میسی ویوس<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ترکیبی پیشنهادی این پژوهش، به زبان برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده‌اند؛ همچنین جواب اولیه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ترکیبی پیشنهادی پژوهش حاضر با استفاده از الگوریتم کرافت و در قالب نرم‌افزار LayoutAdd-in پس از ۱۰ بار اجرای الگوریتم کرافت به دست آمده است. در این پژوهش از رایانه‌ای با مشخصات Intel Core i7 2.4 GHZ CPU و 8GB RAM استفاده شده است.

نتایج محاسبات در جداول ۱۵ و ۱۶، ارائه شده است و درصد بهبود عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی نسبت به الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه شده توسط میسی ویوس<sup>۱</sup> (۲۰۰۳) از نظر زمان حل و مقدار تابع هدف برای هریک از ۱۸ مسئله مورد نظر به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵، نشان داده شده‌اند که حاکی از کاهش زمان حل و بهبود کیفیت جواب هستند.

1. Misevicius, A.

جدول ۱۱. مسیر تولید قطعات و احتمال مربوطه برای مسئله الف

شماره قطعه (k)	مسیرهای تولید	احتمال
۱	۲-۴-۶	۰/۳
	۱-۵-۲-۴	۰/۷
۲	۲-۵-۶	۱
۳	۳-۴-۱	۰/۸
	۵-۱	۰/۲
۴	۱-۲-۳	۰/۵
	۵-۶	۰/۵
۵	۴-۶-۵	۱

جدول ۱۲. مسیر تولید قطعات و احتمال مربوطه برای مسئله ب

شماره قطعه (k)	مسیرهای تولید	احتمال
۱	۲-۴-۱۳-۱۴-۶	۰/۲۵
	۱-۵-۲-۴-۹-۱۳	۰/۷۵
۲	۲-۵-۱۰-۱۵-۶	۱
۳	۳-۴-۱-۱۲-۵	۰/۸۵
	۵-۷-۶-۱	۰/۱۵
۴	۱-۲-۶-۱۱-۳	۰/۵۵
	۵-۱۰-۹-۶	۰/۴۵
۵	۴-۶-۵-۱۵	۱

جدول ۱۳. مسیر تولید قطعات و احتمال مربوطه برای مسئله ج

شماره قطعه (k)	مسیرهای تولید	احتمال
۱	۲-۴-۶-۲۵-۱۲	۰/۱
	۱-۵-۲-۴-۲۰	۰/۹
۲	۱۶-۲-۵-۶	۱
۳	۳-۴-۱-۲۹	۰/۵
	۵-۱۷-۱۱	۰/۲۵
۴	۱-۲-۹-۳۰	۰/۴
	۵-۸-۶	۰/۶
۵	۴-۶-۲۵-۹-۵	۱

جدول ۱۴. جواب اولیه در حالت  $T=5$  برای مسئله الف

مکان‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره زمانی						
۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۳	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۴	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶

جدول ۱۵، بهترین جواب برای مسئله الف در حالت  $P=0.75$  و  $T=5$  را نشان می‌دهد. در این جدول درایه ۴ واقع در تقاطع سطر ۲ و ستون ۶ نشان می‌دهد که ماشین ۴ در دوره ۲ در مکان ۶ واقع می‌شود.

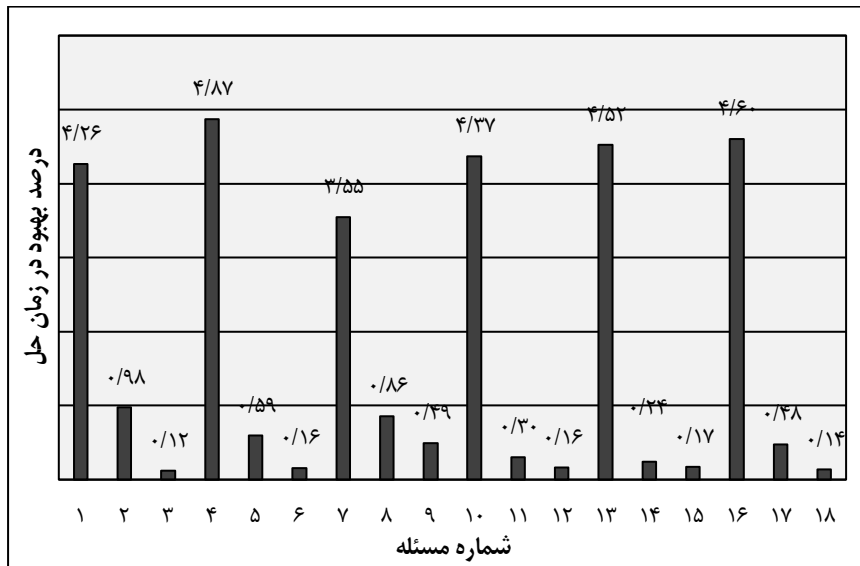
جدول ۱۵. بهترین جواب در حالت  $P=0.75$  و  $T=5$  برای مسئله الف

موقعیت	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دوره زمانی						
۱	۵	۶	۱	۲	۳	۴
۲	۵	۳	۲	۶	۱	۴
۳	۳	۴	۲	۶	۱	۵
۴	۳	۴	۲	۶	۱	۵
۵	۲	۴	۳	۶	۱	۵

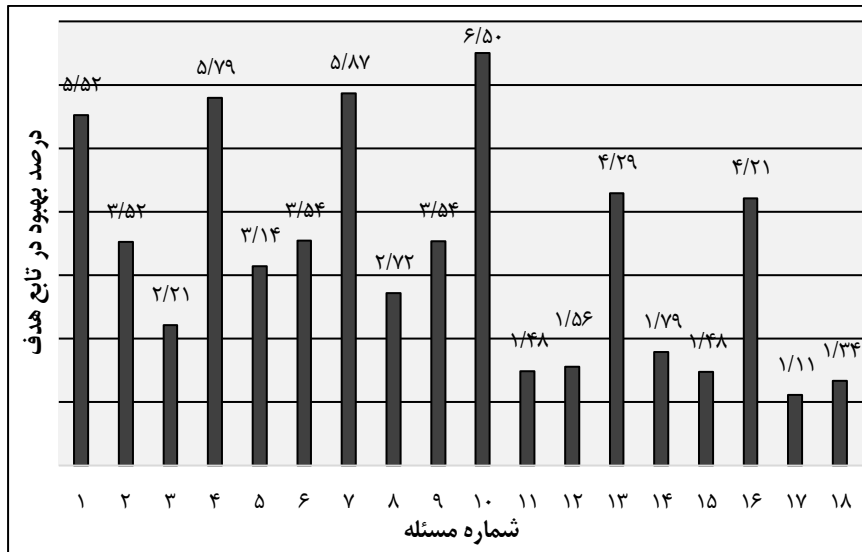
جدول ۱۶. خلاصه محاسبات انجام شده

شماره مسئله	دوره زمانی (T)	سطح اطمینان (p)	تعداد ماشین‌ها (M)	میسی ویوس (۲۰۰۳) (ثانیه)	زمان محاسبه الگوریتم پیشنهادی (ثانیه)	مقدار تابع هدف
۱			۶	۲۱/۵۱	۲۰/۲۱	۵۴۰۱۷
۲		۰/۷۵	۱۵	۲۱۵/۳۵	۲۱۳/۲۵	۲۲۸۱۰۱
۳			۳۰	۸۱۸/۶۶	۸۱۹/۶۶	۲۴۵۳۷۶
۴	۵		۶	۱۲/۵۵	۱۰/۵۵	۶۶۸۰۳
۵		۰/۸۵	۱۵	۲۱۹/۱۵	۲۱۷/۸۵	۲۰۹۶۴۲
۶			۳۰	۷۹۶/۹۷	۷۹۵/۷۲	۲۱۵۰۱۹
۷		۰/۹۵	۶	۱۱/۵۷	۱۰/۸۷	۶۲۲۴۴

شماره مسئله	دوره زمانی (T)	سطح اطمینان (p)	تعداد ماشین‌ها (M)	میلی ویوس (۲۰+۰۳) (ثانیه)	زمان محاسبه الگوریتم پیشنهادی (ثانیه)	مقدار تابع هدف
۸			۱۵	۲۲۱/۰۵	۲۱۹/۱۵	۲۵۵۴۴۷
۹			۳۰	۷۹۹/۰۸	۷۹۵/۱۵	۲۶۴۴۷۳
۱۰			۶	۲۰/۱۴	۲۲/۱۶	۱۲۹۰۶۱
۱۱		۰/۷۵	۱۵	۹۳۴/۹۶	۴۳۸/۶۲	۴۲۱۴۵۵
۱۲			۳۰	۱۶۲۶/۶۷	۱۶۲۴/۰۷	۴۸۱۱۰۷
۱۳			۶	۲۰/۵۴	۱۹/۴۲	۱۴۱۳۵۶
۱۴	۱۰	۰/۸۵	۱۵	۴۳۴/۷۱	۴۳۵/۷۵	۴۸۳۳۳۴
۱۵			۳۰	۱۶۰۰/۰۹	۱۵۹۷/۲۹	۵۵۶۶۲۲
۱۶			۶	۲۰/۶۴	۱۹/۶۹	۱۴۳۵۲۴
۱۷		۰/۹۵	۱۵	۴۸۲/۸۱	۴۸۰/۵۱	۵۲۳۶۶۴
۱۸			۳۰	۲۰۲۵/۷۵	۲۰۲۲/۹۷	۵۴۵۵۵۵



شکل ۴. مقایسه زمان انجام محاسبات



شکل ۵. مقایسه مقادیر تابع هدف

**تحلیل حساسیت.** از تحلیل حساسیت می‌توان برای پشتیبانی از رویه اعتبارسنجی مدل و بررسی درستی مدل بهره گرفت. از آنجاکه درستی مدل مورد تأیید قرار گرفت، از تحلیل حساسیت فقط برای تعیین حساسیت پارامترهای مهم مدل پیشنهادی استفاده می‌شود. برای این منظور روش تحلیل واریانس یک طرفه<sup>۱</sup> به کار می‌رود. بدین ترتیب، حساسیت خروجی مدل (تابع هدف) نسبت به پارامترهای ورودی شامل میانگین تقاضا، واریانس تقاضا و سطح اطمینان بررسی می‌شود. بدین منظور، ۱۰۰ مسئله آزمایشی به‌طور تصادفی تولید و پس از اعمال به مدل پیشنهادی، در سه حالت مختلف به نام‌های  $E$ ،  $V$  و  $P$  توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی حل می‌شوند. در هر یک از این سه حالت، میانگین و واریانس تقاضای محصولات به‌طور تصادفی و با توزیع یکنواخت به ترتیب در فواصل  $[1000, 10000]$  و  $[3000, 10000]$  تولید می‌شوند. در حالت  $E$ ، میانگین (امید ریاضی) تقاضای محصولات با استفاده از  $E' = E + r * E$  تغییر می‌کند؛ درحالی‌که مقادیر دو پارامتر دیگر، یعنی واریانس تقاضای محصولات و سطح اطمینان، ثابت باقی می‌مانند. به‌طور مشابه در حالت  $V$ ، واریانس تقاضا با استفاده از  $V' = V + r * V$  تغییر می‌کند؛ درحالی‌که مقادیر دو پارامتر دیگر، یعنی میانگین تقاضای محصولات و سطح اطمینان، ثابت باقی می‌مانند. در حالت  $P$  نیز فقط مقدار سطح اطمینان با استفاده از  $P = r$  تغییر می‌یابد و مقادیر پارامترهای میانگین و واریانس تقاضا ثابت نگه داشته می‌شوند. در این تحلیل، ۹ مقدار مختلف و دلخواه  $r$  از  $0/1$  تا  $0/9$  در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب، هر حالت شامل ۹ گروه

1. ANOVA

(جامعه) است و هر گروه شامل ۱۰۰ نمونه تصادفی است که هر نمونه درحقیقت مقدار تابع هدف مدل است که از حل هر یک از این ۱۰۰ مسئله به دست می آید. هر یک از واژگان «حالت»، «گروه» و «نمونه» به ترتیب با استفاده از نمادهای  $k, g$  و  $S$  نشان گذاری شده اند؛ به طوری که  $k = E, V, P, g = 1, 2, \dots, 9$  و  $S = 1, 2, \dots, 100$ ؛ همچنین میانگین نمونه های درون گروه  $g$  در حالت  $k$  به صورت  $\mu_g^k$  نمایش داده می شود.

جدول ۱۷. فرضیه های مورد نیاز برای انجام تحلیل حساسیت

حالت	توضیح حالت	فرضیه
E	$E' = E + r * E$ $V' = V$ $P = 0.75$	$H_0^E : \mu_1^E = \mu_2^E = \dots = \mu_9^E$ $H_1^E : \text{حداقل دو میانگین جامعه با هم مخالفاند}$
V	$E' = E$ $V' = V + r * V$ $P = 0.75$	$H_0^V : \mu_1^V = \mu_2^V = \dots = \mu_9^V$ $H_1^V : \text{حداقل دو میانگین جامعه با هم مخالفاند}$
P	$E' = E$ $V' = V$ $p = r$	$H_0^P : \mu_1^P = \mu_2^P = \dots = \mu_9^P$ $H_1^P : \text{حداقل دو میانگین جامعه با هم مخالفاند}$

شرط استفاده از تحلیل واریانس یک طرفه، پیروی میانگین هر گروه از توزیع نرمال است. این شرط با در نظر گرفتن تعداد ۱۰۰ مسئله تصادفی (۱۰۰ نمونه) با توجه به قضیه حد مرکزی محقق می شود. این قضیه بیان می کند که میانگین حداقل ۳۰ متغیر تصادفی تقریباً دارای توزیع نرمال است. هدف تحلیل حساسیت، آزمودن فرضیه های مندرج در جدول ۱۷ با استفاده از روش تحلیل واریانس یک طرفه است. نتایج آزمودن این فرضیه ها که با استفاده از نرم افزار متلب حاصل شده است در جدول ۱۸، مشاهده می شود. با توجه به نتایج به دست آمده،  $(F_p = 3234.35) > (F_E = 1000.97) < (F_V = 195.32)$  است؛ یعنی پارامترهای سطح اطمینان  $p$  و واریانس تقاضا  $v$  به ترتیب دارای بیشترین و کمترین حساسیت هستند.

جدول ۱۸. نتایج آزمون فرضیه‌های جدول ۱۷

P			V			E			حالت
کل	خطا	ستون‌ها	کل	خطا	ستون‌ها	کل	خطا	ستون‌ها	منبع
۱۷۱/۳۵/۲	۱۳۱/۶۶۸	۱۳۴/۲۲۱	۱۳۱/۸۲	۱۳۱/۸۲	۱۳۳/۰۰۶	۱۳۳/۸	۱۷۱/۳۵/۲	۱۳۳/۴۲	مجموع مربعات (SS)
e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	e+۰۰۰	
۸۹۹	۸۹۱	۸	۸۹۹	۸۹۱	۸	۸۹۹	۸۹۱	۸	درجه آزادی (df)
	۱۰۹/۱۸۷	۱۱۲۶/۰۵		۱۰۹/۱۹۲	۱۱۳/۷۵		۱۰۹/۳۷	۱۱۳/۸۱	میانگین مربعات (MS)
	e+۰۰۰	e+۰۰۰		e+۰۰۰	e+۰۰۰		e+۰۰۰	e+۰۰۰	
	۳۲۳۴/۳۵			۱۹۵/۳۲			۱۰۰/۹۷		F = SS / df

### ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

طرح استقرار تسهیلات به میزان زیادی بر کارایی خطوط تولید تأثیر دارد و در استقرار هر تسهیل جدید و یا تغییر مجدد تسهیلات موجود، یک موضوع غیرقابل انکار است؛ بنابراین استقرار صحیح فضاها در هرگونه استقرار تسهیل جدید و یا تغییر در استقرار تسهیلات موجود، به‌ویژه در محیط‌های دارای عدم قطعیت ضروری است.

در این پژوهش، یک مدل ریاضی ارائه شده است که استقرار بهینه تسهیلات در هر دوره زمانی از افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای مسئله استقرار پویای تصادفی تسهیلات در سیستم‌های تولید انعطاف‌پذیر را تعیین می‌کند. نوآوری این مدل در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در تولید با استفاده از مسیرهای چندگانه در تولید محصولات در محیط تصادفی است؛ همچنین در این پژوهش برای حل این مدل پیشنهادی، یک الگوریتم ترکیبی با استفاده از الگوریتم‌های تبرید شبیه‌سازی شده و کرافت ارائه شده است.

برای اعتبارسنجی مدل و ارزیابی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، ابتدا با استفاده از روش طراحی آزمایش، عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از طریق مقایسه با روش برنامه‌ریزی پویا مورد تأیید قرار گرفت؛ به طوری که کیفیت جواب‌های این الگوریتم معادل یا بسیار نزدیک به روش برنامه‌ریزی پویا ارزیابی شد؛ همچنین حل مدل پیشنهادی توسط دو روش برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی و دستیابی به جواب‌های تقریباً یکسان خود حاکی از اعتبار و درستی مدل پیشنهادی است.

در بخش تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش، دو مسئله استقرار تسهیلات در دنیای واقعی (شرکت هواپیمایی ریتون و شرکت ذوب شمال) توسط مدل و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی حل

شد که مقایسه نتایج با روش ارائه شده توسط کریشنان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶)، حاکی از بهبود قابل ملاحظه مقدار تابع هدف و دستیابی به استقرار بهتر تسهیلات برای هر یک از دوره‌ها در یک افق زمانی پنج‌ساله در «شرکت ریتون» است. در خصوص «شرکت ذوب شمال» نیز استقرار بهینه به‌دست آمده از حل مدل، همان استقرار محصولی موردانتظار و مورد استفاده در کارخانه است و این نتیجه نیز به‌دست آمد که با افزایش سطح اطمینان، مقدار تابع هدف نیز افزایش می‌یابد که با توجه به مدل پیشنهادی (رابطه ۲۸)، نتیجه‌ای موردانتظار و دال بر درستی مدل است. در ادامه، ۱۸ مسئله نمونه در اندازه‌های مختلف توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی حل شد و نتایج به‌دست آمده از حل مسائل نمونه نشان داد که الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید ارائه شده توسط میسی ویوس<sup>۲</sup> (۲۰۰۳) دارای عملکرد بهتری از نظر زمان حل و کیفیت جواب نهایی است. همچنین با توجه به جدول ۱۶، مسائل بزرگ‌تر به زمان محاسباتی بیشتری نیاز دارند که امری معقول به نظر می‌رسد و نیز با افزایش سطح اطمینان، مقدار تابع هدف نیز افزایش می‌یابد که این موضوع نیز مطابق انتظار و دال بر درستی مدل ریاضی پیشنهادی در رابطه ۲۸ است؛ زیرا با توجه به این رابطه می‌توان به این نتیجه رسید که تابع هدف به‌طور مستقیم با سطح اطمینان متناسب است و بر اساس این نتایج، مقادیر تابع هدف خیلی به هم نزدیک هستند که حاکی از استواری الگوریتم ترکیبی پیشنهادی است.

در نهایت، به‌منظور بررسی بیشتر رفتار مدل و شناسایی پارامترهای حساس مدل از تحلیل حساسیت استفاده شده است. بر اساس تحلیل صورت گرفته، پارامترهای سطح اطمینان  $p$  و واریانس تقاضا  $v$  به ترتیب دارای بیشترین و کمترین حساسیت هستند. به عبارت دیگر پارامتر سطح اطمینان  $p$  که نمایانگر دیدگاه طراح چیدمان در خصوص تصادفی بودن تقاضای محصولات است، نقش اساسی در تعیین چیدمان بهینه ایفا می‌کند.

با توجه به حل مسائل مختلف در بخش تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش، در خصوص کاربرد مدل پیشنهادی پژوهش، می‌توان به امکان استفاده از آن به‌منظور طراحی استقرار پویای تسهیلات هم‌اندازه در محیط‌های قطعی و تصادفی سیستم‌های تولیدی سنتی و مدرن (انعطاف-پذیر و برخوردار از مسیرهای تولید چندگانه) اشاره کرد که «شرکت ذوب شمال» واقع در استان گلستان و «شرکت هواپیمایی ریتون» را به ترتیب می‌توان به‌عنوان نمونه‌های داخلی و خارجی از این کاربرد نام برد که در این بخش برای اعتبارسنجی مدل و الگوریتم حل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان به چند پیشنهاد مدیریتی به شرح زیر ارائه می‌شود:

1. Krishnan, K. K.

2. Misevicius, A.



نکته نخست اینکه وجود مسیرهای تولید چندگانه برای هر نوع محصول در سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر، به‌ویژه در شرایط عدم قطعیت که در مدل پیشنهادی لحاظ شده است، یک مزیت رقابتی عمده محسوب می‌شود. در این شرایط، انعطاف‌پذیری مسیرهای تولید می‌تواند از طریق کاهش زمان بیکاری دستگاه‌ها باعث افزایش بهره‌وری کلی و در نهایت کاهش هزینه‌ها شود.

نکته دوم این است که توجه مدیریت به مؤثرترین پارامتر مدل روی میزان بهینگی استقرار تسهیلات است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، استقرار تسهیلات حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد هزینه کل تولید را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین با طراحی چیدمان بهینه می‌توان این هزینه را به مقدار زیادی کاهش داد که در نتیجه به کاهش قیمت تمام‌شده محصول منجر می‌شود. با توجه به مدل پیشنهادی، تابع هزینه تابعی از پارامترهای سطح اطمینان، میانگین و واریانس تقاضای محصولات است که با توجه به تحلیل حساسیت انجام‌شده، سطح اطمینان که نمایانگر نگرش طراح چیدمان در خصوص تصادفی بودن تقاضای محصولات است، مؤثرترین پارامتر بر میزان بهینگی استقرار تسهیلات است؛ بنابراین در تعیین مقدار این پارامتر باید دقت کافی صورت گیرد و از روش‌های دقیق‌تر پیش‌بینی به‌منظور تعیین آن استفاده شود. موارد زیر برای انجام پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

- طراحی پایدارترین<sup>۱</sup> طرح استقرار تسهیلات که دارای بیشترین انعطاف‌پذیری نسبت واریانس تقاضا و بهترین طرح استقرار در طول افق برنامه‌ریزی کل است؛
- طراحی استقراری استوار<sup>۲</sup> برای تمام دوره‌های زمانی، به‌گونه‌ای که دیگر نیازی به تغییر چیدمان از یک دوره به دوره‌ای دیگر نباشد؛
- ارائه یک روش فراابتکاری ترکیبی جدید با استفاده از ترکیب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با سایر روش‌های هوشمند؛
- در نظر گرفتن محدودیت‌هایی نظیر ماشین‌هایی با اندازه‌های نابرابر و نیز محدودیت بودجه.

---

1. The most Stable  
2. Robust

## منابع

1. Azadeh, S., Haghghi, S. M., & Asadzadeh, S. M. (2014). A novel algorithm for layout optimization of injection process with random demands and sequence dependent setup times. *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 287–302.
2. Azar, A., & Abbasi, H. (2011). Designing a mathematical model of flexibility manufacturing system. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4, 65-79. (In Persian).
3. Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (1998). Dynamic layout algorithms: A state-of-the-art survey *International Journal of Management Science* 26(4), 507–521.
4. Balakrishnan, J., Jacobs, F. R., & Venkataramanan, M. A. (1992). Solutions for the constrained dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 57, 280–286.
5. Bashiri, M. & Karimi, H. (2015). The application of heuristic and meta-heuristic algorithms in industrial systems design using Matlab software. *Shahed University Press*. (In Persian).
6. Benjaafar, S., & Sheikhzadeh, S. (2000). Design of flexible plant layouts. *IIE Transactions*, 32, 309-322.
7. Braglia, M., Zaroni, S., & Zavanella, L. (2003). Layout design in dynamic environments: analytical issues. *International Transition in Operation Research*, 12, 1-19.
8. Derakhshan Asl, A., & Kuan, K. Y. (2015). Solving unequal-area static and dynamic facility layout problems using modified particle swarm optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28, 1317–1336.
9. Drira, A., Pierreval, H., & Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31, 255–267.
10. Eslaminia, A., & Azimi, P. (2020). Solving the Electric Vehicle Routing Problem Considering the Vehicle Volume Limitation Using a Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Industrial Management Perspective*, 36, 165-188. (In Persian).
11. Fazlelahi, F. Z., Pournader, M., Gharakhani, M., & Sadjadi. (2015). A robust approach to design a single facility layout plan in dynamic manufacturing environments using a permutation-based genetic algorithm. *Journal of Engineering Manufacture*, 230(12), 2264-2274.
12. Forghani, K., Mohammadi, M., & Ghezavati, V. (2013). Designing robust layout in cellular manufacturing systems with uncertain demands. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(2), 215-226.
13. Groover, M. P. (2008). Automation, production systems, and Computer-Integrated manufacturing. *New Jersey: Pearson Education Inc.*
14. Ghadirpour, S. M., Rahmani, D., Moslemipour, G. (2020). Routing flexibility for unequal-area stochastic dynamic facility layout problem in flexible manufacturing systems. *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 31(2), 269-285.
15. Jithavech, I., & Krishnan, K. (2010). A simulation-based approach for risk assessment of facility layout designs under stochastic product demands. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 27-40.
16. Krishnan, K. K., Cheraghi, S. H., & Nayak, C. N. (2006). Dynamic From-Between Chart: a new tool for solving dynamic facility layout problems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(1/2), 182-200.

17. Krishnan, K. K., Cheraghi, S., & Nayak, C. (2008). Dynamic facility layout design for multiple production scenarios in a dynamic environment. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 3(2), 105-133.
18. Kirkpatrick, S., & al, e. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
19. Lee, H. Y., Kang, S., & Chae, J. (2015). Mutation effects in a genetic algorithm for a facility layout problem in QAP form. *International Journal of Advanced Logistics*, 4(3), 170-179.
20. Lee, T. S., Moslemipour, G., Ting, T. O., & Rilling, D. (2012). A Novel Hybrid ACO/SA Approach to Solve Stochastic Dynamic Facility Layout Problem (SDFLP). *Communication in Computer and Information Science, special issue: Emerging Intelligent Computing Technology and Applications*, 304, 100-108.
21. Lee, T., Moslemipour, G., (2012). Intelligent design of a flexible cell layout with maximum stability in a stochastic dynamic situation. *Trends in intelligent robotics, automation, and manufacturing*. Springer, 398-405.
22. Misevicius, A. (2003). A modified simulated annealing algorithm for quadratic assignment problem. *Informatica*, 14, 497-514.
23. Montreuil, B., & LaForge, A. (1992). Dynamic layout design given a scenario tree of probable futures. *European Journal of Operational Research*, 63(2), 271-286.
24. Moslemipour, G. (2017). Robust inter and intra-cell layouts design model dealing with stochastic dynamic problems. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10(4), 123-40.
25. Moslemipour, G. (2016). Dynamic intracellular layout design using simulated annealing algorithm in random environment of cellular manufacturing systems. *National Conference of decision making in engineering and management. Aliabad Katool. COI in civilica: EMDM01\_100*. (In Persian).
26. Moslemipour, G., Lee, T. S. (2012). Intelligent design of a dynamic machine layout in uncertain environment of flexible manufacturing systems. *International Journal of Flexibility Manufacturing System*, 1849-1860.
27. Moslemipour, G., Lee, T. S., & Rilling, D. (2012). A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60, 11-27.
28. Moslemipour, G., Lee, T. S., & Loong, Y.T. (2018). Solving stochastic dynamic facility layout problems using proposed hybrid AC-CS-SA meta-heuristic algorithm. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 28(1), 1-31.
29. Nematian, J. (2014). A robust single row facility layout problem with fuzzy random variables. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72, 255-267.
30. Palekar US et al. (1992). Modeling uncertainties in plant layout problems. *European Journal of Operational Research*, 63, 347-359.
31. Pourvaziri, H., & Naderib, B. (2014). A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem. *Applied Soft Computing*, 24, 457-469.
32. Sahni, S., & Gonzalez, T. (1976). P-complete approximation problem. *Journal of the ACM*, 23(3), 555-565.
33. Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). Robust machine layout

- design under dynamic environment: Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications*, doi.org/10.1016/j.eswax.2019.100015.
34. Sheikh, R., & Shambiati, H. (2016). Facility Location Problem in uncertainty conditions based on D numbers. *Journal of Industrial Management Perspective*, 20, 143-166. (In Persian).
  35. Suman, B., & Kumar, P. (2006). A Survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization. *Operational Research Society*, 57(10), 1143-1160.
  36. Tayal, A. & Singh, S.P. (2017). Integrated SA-DEA-TOPSIS-based solution approach for multi-objective stochastic dynamic facility layout problem, *International Journal of Business and Systems Research*, 11(1/2), 82-100.
  37. Tayal, A., & Singh, S. (2014). Chaotic Simulated Annealing for Solving Stochastic Dynamic Facility Layout Problem. *Journal of International Management Studies*, 14(2), 67-74.
  38. Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B., & Safaei, N. (2007). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 721-728.
  39. Tompkins, J., White, J., Bozer, Y., Frazelle, E., Tanchoco, J., & Trevino, J. (2010). Facility planning 4th Edition. NY: John Wiley & Sons, New York, Inc.
  40. Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Chris Hicks, C. (2016). A tool for solving stochastic dynamic facility layout problems with stochastic demand using either a Genetic Algorithm or modified Backtracking Search Algorithm. *International Journal of Production Economics*, 190, 146-157.